

# 고밀도 패턴드 미디어의 자성 특성 평가에 관한 연구

## The Study on Magnetic Analysis of High Density Patterned Media

이남석\*, 한정원\*, 최의선\*, 한윤성\*\*, 홍종일\*\*, 강신일†

Namseok Lee, Jeongwon Han, Euisun Choi, Yoonsung Han,

Jongill Hong and Shinill Kang

### Abstract

In this paper, we analyzed the effect of the pattern height on the readback signal characteristics of the magnetic nanopillar tops and trench bottoms. In addition, we discuss the applicability of the present method to the production of patterned magnetic media, which can be obtained by depositing magnetic thin films on the molded nanopillars with passive heating. We found that the individual magnetic island deposited on each molded nanopillars with passive heating is a single magnetic domain and confirmed that its magnetization can be successfully reversed by applying an external magnetic field.

**Key Words :** 나노 성형 (Nanomolding), 패턴드 미디어 (Patterned Media), Magnetic Force Microscopy (MFM), 자성 도메인 (Magnetic Domain)

### 1. 서 론

패턴드 미디어 (Patterned media) 는 1 Tera-bits/inch<sup>2</sup> 이상의 초고밀도 달성을 위한 차세대 대용량 저장매체 방식으로서, 미디어 기판 위에 나노 단위의 패턴이 요구된다. 미디어 상의 나노 단위 패턴 제작을 위해, 전자빔 리소그래피, FIB (Focused Ion Beam) 및 이방성 건식 식각 (Dry etching) 등의 방법을 통해 나노 단위의 자성 도트 패턴을 제작하는 연구가 보고 된 바 있다 [1~2].

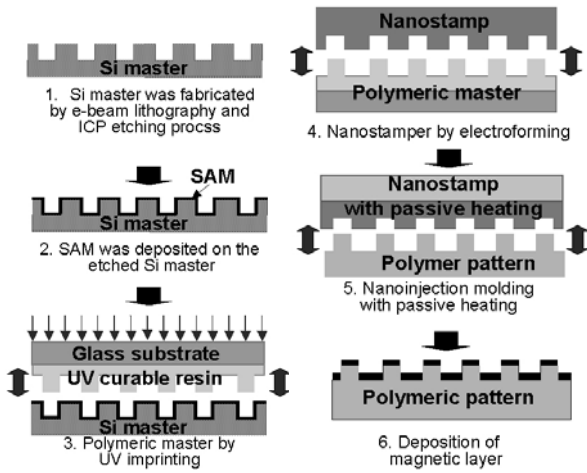
최근에는, 나노 임프린팅 및 사출성형 등의 나노 성형 기술을 통해 제작된 필라 형상의 패턴 상에 자성 물질을 증착하는 방식이, 패턴드 미디어의 저가 양산 기술로서 관심을 받고 있다 [3~4]. 이러한 나노 성형을 통한 패턴드 미디어 제작에 있어서, 성형 필라 패턴의 세장비 (Aspect Ratio), 필라 Top 및 벽면 (Sidewall) 형상, 자성 박막의 두께 등은 최종 패턴드 미디어의 Signal-to-Noise Ratio (SNR) 및 미디어 특성에 큰 영향을 미친다

[5~7]. 성형 필라 패턴을 응용하여 패턴드 미디어에 적용할 경우, 필라 Top 부분의 자성층은 기록막 역할을 하지만, Trench Sidewall 및 Bottom 부분의 자성층은 최종 패턴드 미디어에 있어서 Stray Magnetic Field 로 작용함으로 노이즈로 작용할 수 있다. 필라 패턴을 통해 적용되는 패턴드 미디어의 특성 및 SNR 을 향상시키기 위해서 필라 패턴의 높이 및 세장비의 확보가 요구된다.

본 연구에서는 나노 성형 공정에 의해 제작된 필라 패턴의 높이 및 세장비가 최종 제작된 패턴드 미디어의 Readback Signal 및 자성 도메인 (Magnetic Domain) 의 특성에 미치는 영향을 분석하였다[8]. 패턴 높이가 패턴드 미디어의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해, 수동 가열 (Passive heating) 방식을 응용한 나노 성형 공정을 통해서, 서로 다른 높이를 지닌 50nm 급 나노 필라 어레이를 제작하였다. 또한, 제작된 나노 필라 패턴을 패턴드 미디어로의 적용을 위해 Co-Cr-Pt (CCP) 합금 구조를 지닌 나노 자성 박막을 증착하였다. 최종적으로, 나노 성형 공정을 통해 제작된 자성 나노 패턴의 패턴드 미디어 적용 가능성을 확인하기 위해, Magnetic Force Microscopy (MFM) 를 응용하여 자성 도메인 평가에 관한 연구를 수행하였다. [9-10]

† 연세대학교 기계공학부  
E-mail : snlkang@yonsei.ac.kr  
TEL : (02)2123-2829

\* 연세대학교 기계공학부  
\*\* 연세대학교 신소재공학부

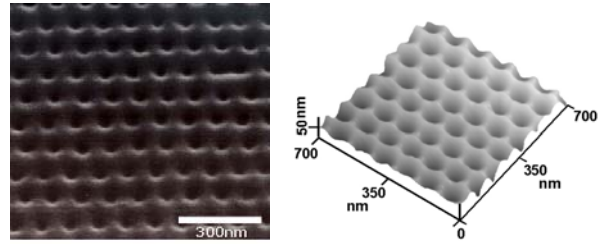


**Fig. 1** Schematic diagram of our fabrication procedure of pillar patterns and its application to patterned media with a passive heating system

## 2. 시편 제작 방법 및 결과

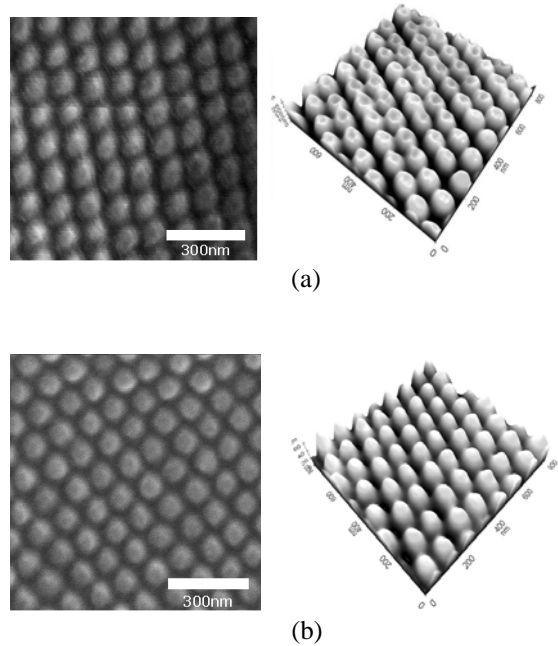
Fig.1 은 본 연구에서의 나노 성형 공정을 통해 자성 나노 패턴을 제작하는 공정의 개략도를 보여 준다. 전자빔 리소그래피 및 건식 식각 방식을 응용하여 Si 나노 마스터를 제작하였다. 제작된 Si 마스터를 응용하여 나노 UV 임프린트 공정을 통해, 전기주조 공정을 위한 폴리머 나노 마스터를 제작하였다. 폴리머 나노 마스터 위에 니켈 seed layer (Nickel Seed Layer) 을 증착한 후, 니켈 전주 (Electroforming) 공정을 통해, 니켈 나노 스탬프를 제작하였다. Fig. 2 는 제작된 금속 나노 스탬프의 패턴 형성 결과를 보여주고 있으며, 전주 공정을 통하여 음각의 나노 홀 패턴이 균일하게 형성되었음을 볼 수 있었다. Fig. 2 에서 보는 바와 같이, 전주 공정을 통해 제작된 금속 나노 스탬프가 폴리머 마스터의 양각 패턴을 우수하게 전사하고 있음을 확인할 수 있다.

나노 필라 패턴을 제작하기 위해 제작된 나노 스탬프를 나노 성형 공정에 적용하였다. 일반적으로 나노 성형 공정 중에 발생하는 고화층 (Solidified layer) 은 높은 점성 (Viscosity) 과 낮은 유동성 (Fluidity) 을 지니기 때문에 용융 폴리머가 스탬프의 미세 패턴에 충전(filling)되는 것을 방해하여 폴리머 패턴의 전사특성 및 패턴 높이를 크게 저하시킨다. 이러한 필라 패턴의 높이 저하 현상은 패턴의 bottom 부분에서 생성되는 표유자계 (Stray magnetic field) 의 증가는 패턴드 미디어의 노이즈를 증가시키며, 미디어 성능이 저하시킬 수 있다. 본 연구에서는 단열층을 이용하여 스탬프



**Fig. 2.** SEM and AFM images of the nanocavities of the metallic nanostamp; The nanocavities were as small as 50 nm in diameter and 100 nm in pitch.

표면온도를 액화 폴리머가 캐비티를 완전히 채울 때까지 유리전이 온도 이상으로 유지시켜 주는 수동가열 (passive heating) 시스템을 적용하였다. 수동 가열 시스템을 응용한 스탬프 온도 제어 시스템을 통해, 폴리머의 점성을 낮추고, 유동성을 높임으로서 나노 패턴의 전사 특성 및 패턴 높이를 향상시켰다. 수동 가열 시스템을 위한 단열



**Fig. 3** The effect of passive heating during the nano molding process with a thermal insulation layer on the molded nanopillar arrays; (a) SEM and AFM image of the surface profiles of the UV-imprinted polymeric master and the molded nanopatterns with the bare nanostamp; the average height of the molded pattern is 12.83 nm. (b) SEM and AFM images of the molded nanopattern obtained using the passive heating system; the average height of the molded pattern is 34.4 nm.

**Table 1** The height and surface roughness of the nanostamp, and the molded nanopatterns produced with and without passive heating by the thermal insulation layer

	Height or depth (nm)	RMS surface roughness (nm)
Nanostamp	35	0.49
Molded nanopatterns without passive heating	12.8	2.23
Molded nanopatterns with passive heating	34.4	1.28

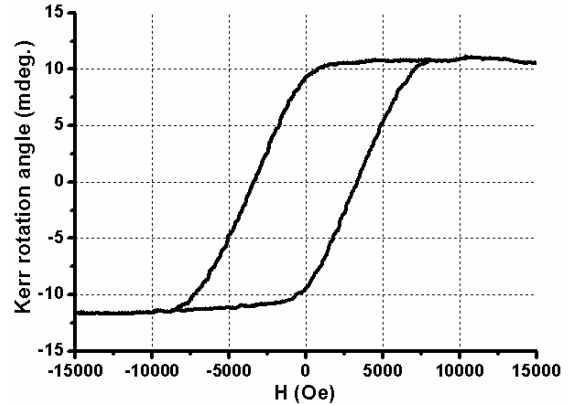
층으로는 두께 75 μm의 폴리이미드 필름이 사용되었다. Fig. 3은 수동 가열이 적용되기 전과 적용된 후 성형된 패턴의 표면 형상 측정 결과를 보여준다. Table 1은 나노 스탬프 및 성형 패턴의 패턴 높이 및 표면 거칠기를 정량적으로 비교하여 보여준다. 수동 가열 방식이 적용되기 전의 나노 필라 패턴의 높이가 12.8nm인 반면, 수동 가열이 적용된 후에는 34.4nm로 높이가 향상되었음을 보여준다. 이는 패턴 깊이가 35nm인 나노 스탬프의 형상과 비교할 때, 수동 가열 방식이 적용된 경우 패턴 높이 및 전사 특성이 눈에 띄게 향상되었음을 확인할 수 있다.

### 3. 필라 패턴에 대한 자성 특성 평가

#### 3.1 자성 필라 패턴의 Readback signal 분석

본 연구에서 제작된 필라 나노 패턴을 패턴드 미디어로 적용하기 위해 고진공 (High Vacuum) 스퍼터링을 통해서 자성 박막을 증착하였다. Co-Cr-Pt (CCP) 합금 계열의 자성 박막을 Ru/Ta 박막 상에 증착하였으며, 수직 자기 기록 특성을 지니며 입자 사이지를 줄이기 위해 Ru 박막을 이중으로 증착하였다. 증착된 CCP 자성박막의 두께는 30nm이며, 증착된 자성 박막의 자성 특성을 평가하기 위해서 Magneto-Optic Kerr effect (MOKE)을 응용하여 박막 특성을 평가하였다. Fig. 4는 본 연구에서 증착되어진 CCP 자성박막에 대한 MOKE 측정 결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이, CCP 박막의 Coercive force가 3400 Oe를 나타냄을 볼 수 있으며, 이 수치는 자성 박막이 패턴드 미디어로의 적용에 충분한 자성 특성을 지님을 보여준다.

필라 Top 및 bottom 부분에서의 Readback Signal 특성을 각각 평가하기 위해, Readback voltage의



**Fig. 4** A perpendicular MOKE hysteresis loop of the 12-nm thick Co-Cr-Pt layer with the Ru/Ta underlayer on the polymeric substrate

Fourier component을 계산하였다 [8]. 자기 미디어의 Readback voltage,  $V_x$ , Wave vector ( $k$ )는 아래 식 (1) 및 (2)와 같이 각각 정의되어 질 수 있다.

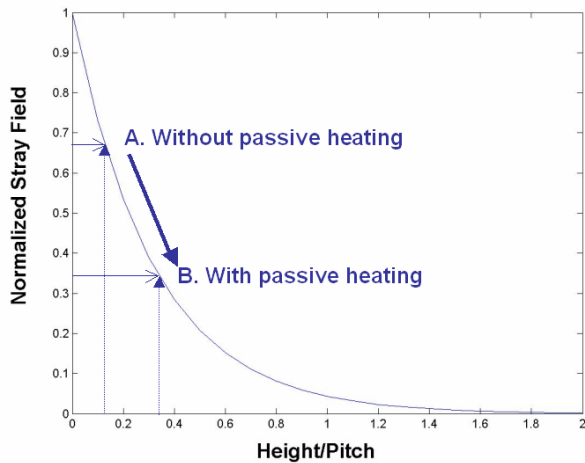
$$V_x(k) \propto e^{-k(a+d)} \frac{1 - e^{-k\delta}}{k\delta} \frac{\sin(kg/2)}{kg/2} \quad (1)$$

$$k = 2\pi / \lambda \quad (2)$$

위 식에서  $a$ ,  $d$ ,  $\delta$  및  $g$ 는 transition parameter, magnetic spacing, medium thickness 및 head gap length를 각각 나타낸다. 본 연구에서 Magnetic spacing ( $d$ )를 제외한 모든 변수들은 상수로 볼 수 있고, 필라 Top 및 bottom에서의 Readback voltage의 차이는 magnetic spacing에 의해서 결정되어 짐을 알 수 있다. 또한, Square-wave recording의 파장 ( $\lambda$ )을  $2p$  (Pitch)로 가정하고, 패턴의 bottom 부분에서의 Readback signal을 필라의 top에서의 Readback signal 값으로 정규화함으로 Normalized stray signal 값을 결정하였다. Fig. 5는 Trench bottom에서의 Normalized stray signal 값을 보여준다. Fig. 5에서 보는 것과 같이, 패턴 높이에 따라 Exponential함수로 감소함을 알 수 있다. 식 (3)은 이 관계를 수치적으로 나타내 준다.

$$V_x^{bottom}(k) / V_x^{top}(k) \propto e^{-k(a+d+h)} / e^{-k(a+d)} = e^{-kh} = e^{-\pi h/p} \quad (3)$$

위 식에서  $h$  및  $p$ 는 나노 필라의 높이 및 피치를 각각 나타낸다. 식 (3)에서 보는 바와 같이, 고세장비 및 깊은 trench 또는 높은 필라 패턴 형상은 패턴드 미디어 응용에 있어서 우수한 SNR 값을 얻을 수 있게 해준다.

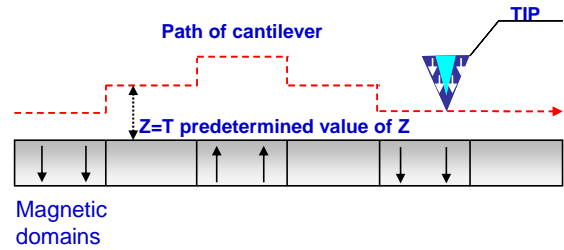


**Fig. 5** Normalized stray signal from the trench bottom decays exponentially with the height/pitch of the nanopillar

Table1 에서 보는 바와 같이, 수동가열 방식이 적용되지 않고 성형된 나노 필라 패턴의 높이는 12.8 nm 이고, 패턴 높이가 CCP 자성 박막의 두께 보다 적은 수치이다. 이 경우, Trench bottom 에서의 자성 신호는 심각한 노이즈 요인이 될 수 있다. 반면, 수동가열을 적용하여 성형된 필라 패턴의 높이는 34.4nm 이며, 이 높이는 자성 박막의 두께 보다 크게 된다. Fig. 5 에서 보는 바와 같이, 수동가열 적용에 의해서, 50.6%의 노이즈 감소 효과가 있음을 확인할 수 있다. 이는 수동가열에 의해 패턴 높이가 향상된 성형 필라 패턴의 경우 노이즈가 감소되어 SNR 값이 향상되고 적용되는 미디어 특성이 향상될 것으로 사료된다.

### 3.2 미디어 기판의 자성 도메인의 평가

자성박막이 증착된 필라 패턴의 표면 구조 및 특성을 분석하기 위해 SEM (Scanning Electron Microscopy) 을 응용하였고, 필라 패턴의 자성 특성을 분석하기 위해, MFM (Magnetic Force Microscopy) 을 응용하였다. Fig. 6 은 본 연구에서 응용된 MFM 측정 시스템의 개략도를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 MFM 은 MFM 팁과 자화된 샘플 간의 자성적인 힘을 분석함으로써 표면의 자성 도메인을 분석한다. MFM 팁은 AFM 팁 표면에 자성 박막을 입힌 구조로 이루어지며, 각 실험마다 자성적으로 포화 (Saturation) 시킨 후에 측정한다. MFM의 해상도는 팁의 Sharpness, 자성 박막의 두께, MFM 측정시 Lift 높이에 의해 결정된다 [9-10]. MFM 측정 시스템으로 Digital Instruments 사의 Multimode SPM 시스템을 응용하였다. MFM 측정 해상도를 향상시키기 위해, 탐침



**Fig. 6** Schematic diagram of MFM Measurement system with magnetic deposited MFM tip

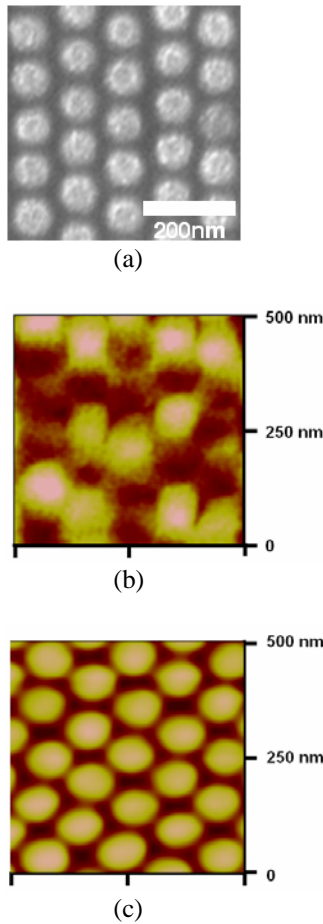
(Probe) 의 한쪽 면에만 자성박막이 증착된 MFM 팁을 응용하였다. 또한, MFM 팁에 증착된 자성 박막의 두께는 35 nm 및 20 nm 두 가지 타입으로 적용하였다.

Fig. 7 은 자성 나노 필라의 SEM 및 MFM 분석 결과를 보여준다. Fig. 7a 는 패턴드 미디어의 표면 특성 및 구조에 대한 SEM 이미지를 보여준다. Fig. 7a 는 자성박막이 증착된 자성 필라 패턴이 균일하게 배열되었음을 보여 준다. 또한, Fig. 7b 는 탈자화 상태 (De-magnetized state) 에서의 MFM 이미지를 보여준다. Fig. 7b 에서 보는 바와 같이, 노란색 및 검정색 부분의 도메인 (Domain) 들이 Random 하게 형성되었음을 볼 수 있으며 각 도메인들은 upward 및 downward 방향의 자화 방향을 나타낸다. 측정 결과를 통해, 각 자성 필라 패턴이 upward (노란색) 또는 downward (검정색)의 자화방향을 지니는 단자구 (Single Magnetic Domain) 가 각각 형성되었음을 볼 수 있다.

각 자성 필라 패턴의 자기 기록 특성을 평가하기 위해, 15 kOe 의 자기장을 적용하여 각각의 자성 나노 패턴을 동일한 자화 방향으로 포화시켰다. Fig. 7c 는 동일한 방향의 자기장으로 포화된 자성 패턴이 노란색의 도메인을 형성하고 있으며, 이는 각 자성 패턴들이 동일한 방향의 단자구를 형성하고 있음을 보여준다. Fig. 7a 및 c 에서 보는 바와 같이, 미디어 기판상의 자성필라 패턴들이 균일하게 배열되어 있으며, 또한, 이러한 자성 필라 패턴에 적용되어진 자기장의 방향을 따라 균일하게 자화되었음을 볼 수 있다. 본 측정 결과를 통해서, 수동 가열 방식을 응용하여 성형된 나노 필라 패턴의 패턴드 미디어로의 적용 가능성을 확인할 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 나노 성형 공정을 통해 제작된 패턴드 미디어의 자성 특성을 평가하였다. 우선, 패턴드 미디어 적용시 Readback signal 특성을 분석



**Fig. 7** Surface and magnetic images for magnetic patterns, which is produced by using our molding with passive heating. (a) SEM image of the media surface, (b) MFM image for the as-deposited film in the demagnetized state (pillars are randomly magnetized but their magnetization is either “upward” (yellow) or “downward” (black)), and (c) MFM image at the remanent state after magnetic saturation (the yellow on the pillars indicates that they are saturated in only one direction).

하기 위해, Readback voltage 의 Fourier component 을 응용하여 Trench bottom 에서의 Normalized stray signal 값을 분석하였다. 나노 성형 공정시 수동 가열을 적용하여, 패턴 높이가 12.8 nm 에서 34.4 nm 로 향상되었을 때, Trench bottom 에서 발생하는 노이즈가 50.6% 감소됨을 확인할 수 있다. 또한, 성형된 패턴 상에 자성박막을 증착하여 제작된 자성 필라 패턴에 대해 MFM 을 분석한 결과 각 자성 패턴들이 Single Domain 상태가 형성되었음을 확인할 수 있었다. 이를 통해, 수동가열 방식에 의해 패턴 높이가 향상되어진, 자성 필라 패턴이 패턴드 미디어로 적용 가능함을 확인할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 21 세기 프론티어연구개발사업의 일환인 나노메카트로닉스기술 개발사업단의 연구비 지원 (M102KN010005-07K1401-00530)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] T. Aoyama, K. Uchiyama, T. Kagotani, K. Hattori, Y. Wada et al., 2001, "Fabrication and properties of CoPt patterned media with perpendicular magnetic anisotropy," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37(4), pp. 1646-1648.
- [2] J. Lohau, A. Moser, C. T. Rettner, M. E. Best and B. D. Terris, 2001, "Writing and reading perpendicular magnetic recording media patterned by a focused ion beam," Applied Physics Letter, Vol.78(7), pp. 990-992.
- [3] G. M. McClelland, M. W. Hart, C. T. Rettner, M. E. Best, K. R. Carter et al., 2002, "Nanoscale patterning of magnetic islands by imprint lithography using a flexible mold," Appl. Phys. Lett., Vol.81, No.8, pp. 1483-1485.
- [4] J. Moritz, S. Landis, J. C. Toussaint, P. Bayle-Guillemaud et al. 2002, "Patterned Media Made From Pre-Etched Wafers: A Promising Route Toward Ultrahigh-Density Magnetic Recording," IEEE Trans. Magn., Vol.38, No.4, pp.1731-1736.
- [5] S. Landis, B. Rodmacq, P. Bayle-Guillemaud, V. Baltz and B. Diény, 2004. "Fabrication and Characterization of Magnetic Media Deposited on Top or Side Edges of Silicon Dots," Japanese Journal of Applied Physics, Vol.43, Issue 6B, pp.3790-3795.
- [6] H.J. Richter, A.Y. Dobin, O. Heinonen, K.Z. Gao, R.J.M et al., 2006, "Recording on Bit-Patterned Media at Densities of 1 Tb/in<sup>2</sup> and Beyond," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.42, Issue10, pp.2255-2260.
- [7] P. W. Nutter, D. M. McKirdy, B. K. Middleton, D. T. Wilton et al., 2004, "Effect of Island Geometry on the Replay Signal in Patterned Media Storage," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.40, No.6, pp.3351-3558.
- [8] S. X. Wang, A. M. Taratorin, "Magnetic information storage technology," Academic Press, Ch. 3, pp. 52-56. 1998.
- [9] S. Porthun, L. Abelmann and C. Ladder, 1998, "Magnetic force microscopy of thin film media for high density magnetic recording," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.182, pp.238-273.
- [10] H. Hopster and H. P. Oepen, 2005, "Magnetic Microscopy of Nanostructures," Springer, Ch12, pp. 253-282.